

# 基于硅基液晶的空分复用彩色全息显示研究

王岳<sup>1</sup> 沈川<sup>1</sup> 张成<sup>1,2</sup> 刘凯峰<sup>1</sup> 韦穗<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039)  
(<sup>2</sup>安徽省现代成像与显示技术重点实验室, 安徽 合肥 230039)

**摘要** 彩色全息显示是全息显示的一个重要研究目标。研究了使用 RGB 三色激光的彩色全息显示技术, 提出基于空分复用的彩色全息显示方法。全息光电再现像的成像区域大小和成像区域中心位置依赖于 RGB 三色激光的波长, 通过调节 RGB 三色分量原图大小以及加载数字闪耀光栅实现 RGB 三色再现图像分量区域大小和成像中心的重合。基于空分复用的方法建立了彩色全息显示系统, 最终的彩色全息显示系统利用空间光调制器加载计算生成的 24 bit 全息图再现彩色图像。实验结果验证了该方法的可行性。

**关键词** 全息; 彩色全息显示; 空间光调制器; 空分复用; 纯相位全息图

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1209001

## Research on Color Holographic Display with Space Division Multiplexing Based on Liquid Crystal on Silicon

Wang Yue<sup>1</sup> Shen Chuan<sup>1</sup> Zhang Cheng<sup>1,2</sup> Liu Kaifeng<sup>1</sup> Wei Sui<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Key Laboratory of Intelligent Computing & Signal Processing, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China)  
(<sup>2</sup>Key Laboratory of Modern Imaging and Displaying Technology of Anhui Province, Hefei, Anhui 230039, China)

**Abstract** Color holographic display is an important goal of holographic display research. Color holographic display technology using RGB lasers is studied, and color holographic display method based on space division multiplexing is proposed. Both the size and center of holographic optoelectronic reconstruction image depend on the wavelength of RGB lasers. The method by adjusting the original sizes of the RGB components of color images and adding digital blazed grating to achieve the coincidences of the sizes and centers of RGB reconstructed images is proposed. The color holographic display system with space division multiplexing method is developed, and hologram generated by 24-bit computer is added to spatial light modulator to reconstruct the color images by the advanced physics setup. Experimental results demonstrate the feasibility of the method proposed.

**Key words** holography; color holographic display; spatial light modulator; spatial multiplex; phase-only hologram

**OCIS codes** 090.2870; 090.1970; 070.6120; 090.1760

## 1 引言

真三维显示技术是现代成像技术的终极目标, 全息技术是一种很有前途的真三维显示技术<sup>[1~3]</sup>, 而彩色全息显示是全息显示的一个重要研究内容。近年来, 为了满足动态彩色全息显示的需求, 使用空间光调制器 (SLM) 的全息显示得到了迅猛的发

展<sup>[4~8]</sup>。硅基液晶 (LCOS) 作为液晶空间光调制器的一种, 具有可编程、高衍射效率和低功耗等优点<sup>[9~11]</sup>, 因此 LCOS 被认为是实现全息显示最有可能的空间光调制器。

然而, 使用 LCOS 等 SLM 器件实现彩色全息显示仍然面临许多挑战, 例如由于 RGB 三色激光的

收稿日期: 2012-07-13; 收到修改稿日期: 2012-09-04

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金 (20113401130001), 安徽省自然科学基金 (1208085QF114) 和安徽大学青年基金 (KJQN1010, KJQN1120) 资助课题。

作者简介: 王岳 (1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事全息显示方面的研究。E-mail: wangyue5960@163.com

导师简介: 韦穗 (1946—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事计算视觉与三维全息显示等方面的研究。

E-mail: swei@ahu.edu.cn (通信联系人)

波长不同而导致光电再现像的成像区域大小不同和成像区域中心的偏离等问题,这也是本文研究的重点。国内外研究者针对这一问题开展了相应的研究,Zhao等<sup>[12]</sup>通过用零填充数字全息图的方法调整重构的单体全息图成像大小。Martinez等<sup>[13]</sup>使用基于波长补偿的方法来改变成像大小。Ferraro等<sup>[14]</sup>在非涅耳变换产生数字全息图的过程中通过控制重建振幅和相位图像的大小来处理这一问题。

本文通过调节三基色原图大小的方法解决RGB三色成像区域大小不一致的问题,通过加载数字闪耀光栅来补偿成像中心需要偏移量,并基于空分复用的方法搭建了彩色全息显示系统,给出了相应的实验结果。实验结果验证所提的方法可以有效地实现彩色全息显示。

## 2 彩色全息显示成像分析

对于彩色全息显示,通常采用RGB三色激光器作为光源,利用时分复用或者空分复用的方法建立彩色全息显示系统<sup>[5,6,15,16]</sup>。时分复用是使用三色激光器分别照射单片空间光调制器进行光学再现<sup>[15,16]</sup>,利用人眼视觉暂留特性得到彩色全息再现像。这种方法只使用一片LCOS,系统相对简单,但是该方法需要精确地控制单色光源的工作时间与加载对应颜色分量全息图的同步性,这对加载三色信息的硬件在响应速度上有较高的要求,并且对于颜色分量来说时间轴上会有能量损失。空分复用方法采用RGB三色激光器分别照射三片空间光调制器进行光学再现<sup>[5,6]</sup>,但是如文献[5]所述的空分复用技术系统能量损失不同,使得RGB三色激光的强度不同,导致再现像三色分布不均匀,这样重构的彩色图像质量降低。文献[6]的空分复用系统将一片LCOS面板根据三基色分为三色区域,但是使用三色激光分别照射LCOS对应区域时需要使用光阑对其他颜色进行遮挡,由于调节光阑有失精准,所以有串色的可能性,光学显示效率不高。本文通过合色棱镜使其在同一平面内成像,并在再现平面内实现三色再现分量的空间叠加合成。这种方法实现的系统具有高的光学效率,并在分辨率方面有诸多优势,这将是彩色全息显示领域的一个重要的发展方向。但是由于空分复用的彩色全息显示系统采用的光学元件较多,结构较为复杂,导致系统稳定性降低。本文将重点研究RGB三色激光器的波长不同导致再现像成像区域大小不同以及成像区域中心位置的偏离。

全息显示是利用衍射原理进行成像,彩色全息显示使用RGB三色激光作为光源,光电再现像的成像区域大小依赖于三色激光的波长,不同的波长导致成像区域大小不同,由傅里叶重构几何<sup>[2]</sup>分析得到基于LCOS的全息显示系统产生再现像大小 $\Delta h$ :

$$\Delta h = \frac{\lambda f}{p}, \quad (1)$$

式中 $\lambda$ 为激光的波长, $f$ 为消色差透镜的焦距, $p$ 为LCOS的像素间距。由此可知,成像区域与 $\lambda$ 、 $f$ 、 $p$ 三个参数有关,对于本系统来说,当参数 $f$ 和 $p$ 固定时,此时全息成像区域大小只与三色激光的波长 $\lambda$ 有关,成像区域大小的比例关系为

$$\Delta h_r : \Delta h_g : \Delta h_b = \lambda_r : \lambda_g : \lambda_b, \quad (2)$$

式中 $\Delta h_r$ 、 $\Delta h_g$ 和 $\Delta h_b$ 分别是红色、绿色和蓝色全息再现像在单一维度上的长度, $\lambda_r$ 、 $\lambda_g$ 和 $\lambda_b$ 分别对应红色、绿色和蓝色激光的波长。因为LCOS的像素间距在 $x$ 和 $y$ 维度上相同,所以RGB三色全息图再现像的大小示意图如图1所示(仅考虑一级衍射区域,彩图请见网络电子版)。其中,中心的白色点是衍射成像的零级斑,“▲”、“★”和“■”分别代表蓝色、绿色和红色的一级干涉极大点, $O_b$ 、 $O_g$ 和 $O_r$ 分别为蓝色、绿色和红色再现像的中心,其坐标分别为 $(\frac{\lambda_r}{2p}, \frac{\lambda_r}{2p})$ 、 $(\frac{\lambda_g}{2p}, \frac{\lambda_g}{2p})$ 和 $(\frac{\lambda_b}{2p}, \frac{\lambda_b}{2p})$ 。由于RGB三色激光波长不同,这是导致全息成像区域大小不同的主要原因,下面对其进行分析(以纵向坐标为例)。

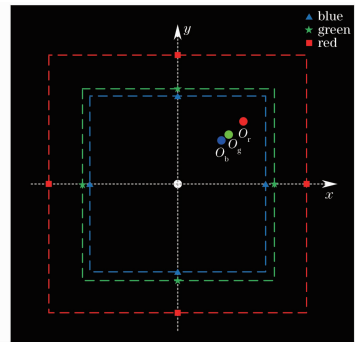


图1 红绿蓝三色全息再现成像示意图

Fig. 1 Scheme of RGB holographic display

本文通过调节三基色原图大小的方法解决RGB三色成像区域大小不一致的问题。通过改变原始彩色图像的RGB三色分量图的像素数,使RGB三色分量图在纵向坐标上的像素数最终满足:

$$n_r : n_g : n_b = \frac{1}{\lambda_r} : \frac{1}{\lambda_g} : \frac{1}{\lambda_b}, \quad (3)$$

式中 $n_r$ 、 $n_g$ 和 $n_b$ 分别是红色、绿色和蓝色在纵向坐标上的像素数。由于 $\lambda_r > \lambda_g > \lambda_b$ ,所以选择以蓝色

分量图为基础,调整红色和绿色分量图的原始像素大小。

由于三色分量的成像区域大小不同,所以三色分量的中心  $O_r$ 、 $O_g$  和  $O_b$  不重合,导致了不能正确地合成 RGB 分量。以蓝色为基准,根据中心点  $O_r$ 、 $O_g$  和  $O_b$  的坐标,红色再现图像和绿色再现图像的中心需要校正的位移大小分别为

$$\Delta r_{by} = \frac{\lambda_r}{2p} - \frac{\lambda_b}{2p}, \quad \Delta g_{by} = \frac{\lambda_g}{2p} - \frac{\lambda_b}{2p}, \quad (4)$$

$$\Delta r_{bx} = \frac{\lambda_r}{2p} - \frac{\lambda_b}{2p}, \quad \Delta g_{bx} = \frac{\lambda_g}{2p} - \frac{\lambda_b}{2p}, \quad (5)$$

式中  $\Delta r_{by}$  和  $\Delta r_{bx}$  分别是红色分量在纵向方向和横向方向需要校正的位移大小,  $\Delta g_{by}$  和  $\Delta g_{bx}$  分别是绿色分量在纵向方向和横向方向需要校正的位移大小,因此每个颜色分量在纵向方向和横向方向需要校正的位移大小相等。

根据文献[17]可得闪耀光栅周期与光偏转角度大小的关系为

$$m = \frac{\lambda}{\Delta p}, \quad (6)$$

式中  $m$  是闪耀光栅的周期数,  $\Delta$  是需要校正的位移大小值。在角度很小的情况下,光偏转的角度近似等于每个分量需要校正的位移大小。由(6)式可知,闪耀光栅对光方向改变的大小是闪耀光栅周期和波

长的函数,因此需要校正的位移大小可以由(6)式计算得到需要加载的闪耀光栅周期。将(4)、(5)式代入(6)式可得

$$m_r = 2 \frac{\lambda_r}{\lambda_r - \lambda_b}, \quad m_g = 2 \frac{\lambda_g}{\lambda_g - \lambda_b}, \quad (7)$$

式中  $m_r$  和  $m_g$  分别是红色分量和绿色分量全息图的中心点需要加载的数字闪耀光栅的周期。

### 3 彩色全息显示系统

本文借鉴了目前商业投影仪的结构,搭建了基于 LCOS 空分复用的彩色全息显示系统,如图 2 所示。其中,图 2(a)为本文所采用的空分复用方法实现彩色全息显示系统的原理框图,图 2(b)是本文搭建的实现彩色全息显示实验装置平台。系统由激光器、空间滤波器、透镜、LCOS 及其驱动电路、分光棱镜(BS)和合色棱镜组成。具体实验步骤如下:由 RGB 三色激光器产生的激光经过空间滤波器进行滤波扩束后,经过准直透镜使得光束变为平行光,三色平行光束分别经过分光棱镜垂直照射对应的 LCOS,三色光波经过 LCOS 调制后产生的全息再现像再经过合色棱镜在重构平面进行叠加产生彩色图像。

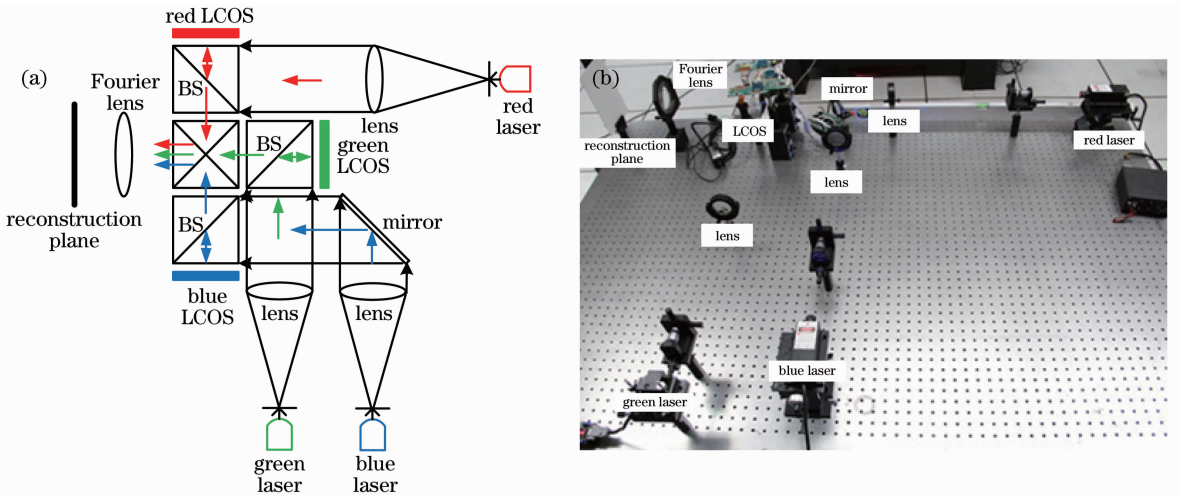


图 2 基于空分复用的彩色全息显示图。(a)系统原理图;(b)系统装置图

Fig. 2 Color holographic display images based on space division multiplexing.

(a) Schematic of the system; (b) system setup

图 3 是采用彩色全息显示装置(图 2)所得到的光电再现结果,其中未加载全息图的再现结果如图 3(a)所示,与第 2 节中图 1 的分析一致。图 3(b)为加载全息图的结果,可以看出 RGB 三色再现像的成像大小不同,成像中心位置不重合。

根据第 2 节的分析需要按照(3)式的比例调节三基色原图大小,这样可以实现成像区域大小不同的补偿。本文采用蓝色分量作为基准量,根据(3)式对红色和绿色分量的像素数按照比例缩放。实验室所用的激光器波长分别为  $\lambda_r = 655 \text{ nm}$ ,  $\lambda_g = 532.8 \text{ nm}$ ,

$\lambda_b = 473 \text{ nm}$ 。选用的 LCOS 为 Aurora 公司生产的 ASI6001 芯片,其分辨率为  $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ ,像素间距为  $8 \mu\text{m}$ 。因此根据(3)式可得到红色和绿色分量的像素数分别为:  $1386 \text{ pixel} \times 780 \text{ pixel}$  和  $1705 \text{ pixel} \times 959 \text{ pixel}$ ,通过补零的方法将缩放的红色和绿色分量的像素数再扩展到  $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ ,得到新的三色分量。然后,采用傅里叶迭代算法<sup>[18]</sup>对新的三色分量分别进行迭代计算,将计算出的全息图加载到图 2(b)所示系统装置平台

的三片 LCOS 上,得到改进的彩色全息图像如图 3(c)所示。

从图 3(c)可以看出,三色分量的再现图像大小相同,但是成像的中心点不重合,所以仍然不是一个高质量的彩色图像。需要对计算的全息图进行再一次处理。由第 2 节分析可知,红色分量和绿色分量全息图的中心点需要加载的数字闪耀光栅的周期分别约为 7 和 18。加载数字闪耀光栅之后的彩色全息显示结果如图 3(d)所示。

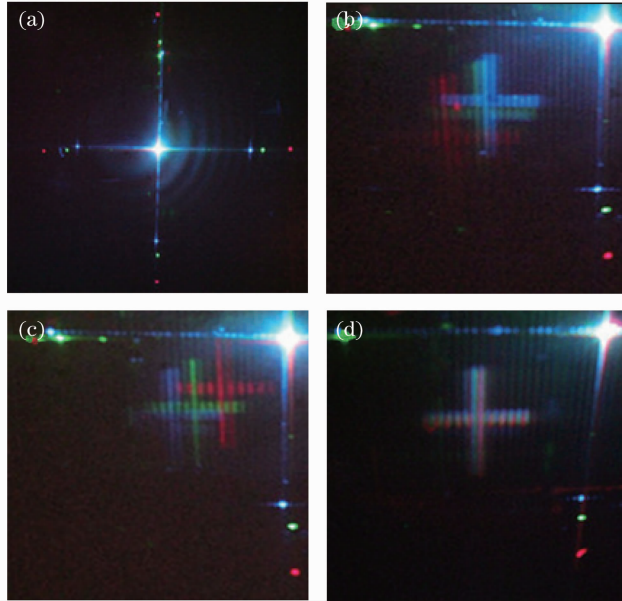


图 3 彩色全息再现像。(a)未加载全息图;(b)原始全息图;(c)调整后全息图;(d)最终全息图  
Fig. 3 Reconstructed images of color holography. (a) Un-added hologram; (b) original hologram; (c) adjusted hologram; (d) final hologram

鉴于以上分析,本文选择仅包括简单的 RGB 三色分量的彩色图像[图 4(a)]作为原始图像,首先将原始图像的红色和绿色分量按(2)式进行缩放,并用补零的方法将红色和绿色分量的像素数扩展到与蓝色相同,调整后的原图如图 4(b)所示。然后对图 4(b)的 RGB 三色分量分别用迭代傅里叶算法进

行计算,并对计算得到的纯相位全息图的红色分量和绿色分量分别加载周期为 7 和 18 的数字闪耀光栅,生成 8 bit 的三色分量全息图,将生成的 8 bit 三色分量全息图用 Matlab 的级联函数合成为 24 bit 的全息图。最后将 24 bit 全息图加载到空分复用的彩色全息显示系统平台中,再现的结果如图 4(c)所示。

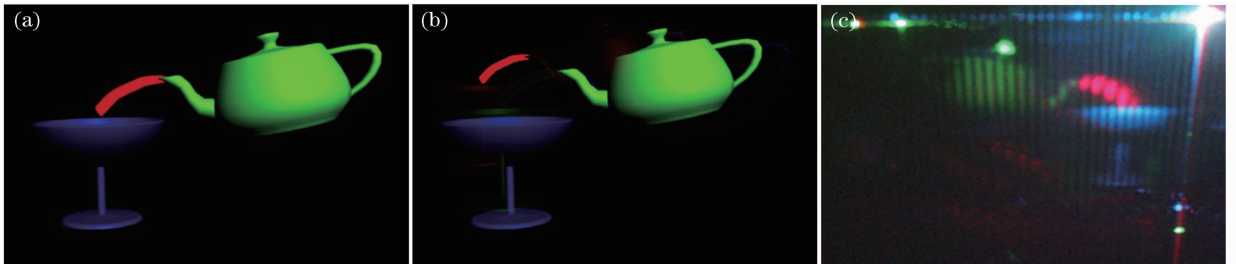


图 4 彩色全息显示。(a)原始图像;(b)调整后的图像;(c)光电重构图像

Fig. 4 Color holographic display images. (a) Original image; (b) adjusted image; (c) optoelectronic reconstructed image

应当指出的是,与文献[5,6,15,16]中实现全息再现像时也都需要屏幕或者 CCD 接收重构图像一

样,有限的空间分辨率和大的像素间距严重限制了宽视场角和双眼立体视觉,完全不能满足人眼所需

要的衍射角。本文重建的全息图目前还未有立体显示效果, 主要是因为 LCOS 的空间分辨率有限与衍射角不足。

## 4 结 论

首先引入了 RGB 三色激光波长不同所导致的再现像成像大小不同和成像中心偏离的问题, 提出通过调节 RGB 三色分量原图大小以及加载数字闪耀光栅实现了 RGB 三色再现图像分量的重合; 最后使用 LCOS 器件基于空分复用的方法建立了彩色全息显示实验装置平台, 并将计算生成的全息图加载到装置平台上再现彩色图像, 验证了本文提出的利用空分复用方法实现彩色全息显示的可行性。下一步的工作方向是研究如何扩大 LCOS 的衍射角, 实现真三维全息立体显示。

## 参 考 文 献

- 1 Emmett N. Leith, Juris Upatnieks. Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects[J]. *Opt. Soc. Am.*, 1964, **54**(11): 1295~1301
- 2 Maurice Stanley, Pat B. Conway, Stuart Coomber *et al.*. A novel electro-optic modulator system for the production of dynamic images from Giga-pixel computer generated holograms [C]. *SPIE*, 2000, **3956**: 13~22
- 3 Melania Paturzo, Pasquale Memmolo, Andrea Finizio *et al.*. Synthesis and display of dynamic holographic 3D scenes with real-world objects[J]. *Opt. Soc. Am.*, 2010, **18**(9): 8806~8815
- 4 Michael L. Huebschman, Bala Munjuluri, Harold R. Garner. Dynamic holographic 3-D image projection[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(5): 437~445
- 5 Fahri Yaras, Levent Onral. Color holographic reconstruction using multiple SLMs and LED illumination[C]. *SPIE*, 2009, **7237**: 723700
- 6 Michal Makowski, Izabela Ducin, Maciej Sypek *et al.*. Color image projection based on Fourier holograms[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(8): 1227~1229
- 7 Chen Jun, Zhao Xing, Fang Zhiliang. Complex amplitude modulation using a phase-only spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100205
- 8 陈 君, 赵 星, 方志良. 基于纯相位空间光调制器的复振幅调制研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(s1): s100205
- 9 Zheng Huadong, Dai Linmao, Wang Tao *et al.*. Optoelectronic reconstruction of three-dimensional scenes based on multiple fractional-Fourier-transform holograms [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(2): 020901
- 10 郑华东, 代林茂, 王 涛等. 三维物场多重分数傅里叶变换全息图光电再现实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(2): 020901
- 11 Marcus Recherter, Susanne Zwick, Tobias Haist *et al.*. Fast digital hologram generation and adaptive force measurement in liquid-crystal-display based holographic tweezers [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(5): 888~896
- 12 Shen Chuan, Zhang Cheng, Liu Kaifeng *et al.*. Research on issues about reconstructed holographic image based on a pixelated spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0309001
- 13 沈 川, 张 成, 刘凯峰等. 基于像素结构空间光调制器的全息再现像问题研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0309001
- 14 Justo Arines. Impact of liquid crystals in active and adaptive optics[J]. *Materials*. , 2009, **2**(2): 549~561
- 15 Jianlin Zhao, Hongzhen Jiang, Jianglei Di. Recording and reconstruction of a color holographic image by using digital lensless Fourier transform holography[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(4): 2514~2519
- 16 Jose Luis Martinez, Antonio Martinez-Garcia, Lgnacio Moreno. Wavelength-compensated color Fourier diffractive optical elements using a ferroelectric liquid crystal on silicon display and a color-filter wheel[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(5): 911~918
- 17 Pietro Ferraro, Sergio De Nicola, Giuseppe Coppola *et al.*. Controlling image size as a function of distance and wavelength in Fresnel-transform reconstruction of digital holograms[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(8): 854~856
- 18 Tomoyoshi Shimobaba, Tomoyoshi Ito. A color holographic reconstruction system by time division multiplexing with reference lights of laser[J]. *Opt. Rev.*, 2003, **10**(5): 339~341
- 19 Atsuhiko Sugita, Kunihiro Sato, Masakazu Morimoto *et al.*. Full-color holographic display with wide visual field and viewing zone[C]. *SPIE*, 2005, **6016**: 60160Y
- 20 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 193~196
- 21 郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 193~196
- 22 R. W. Gerchberg, W. O. Saxton. A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, **35**: 237~246